

Научная статья
 УДК 621.3.01:631.171
 doi:10.35694/YARCX.2022.57.1.015

ВЛИЯНИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Олеся Александровна Пустовая¹, Евгений Анатольевич Пустовой²,
 Татьяна Алексеевна Илюхина³**

^{1, 2, 3}Дальневосточный государственный аграрный университет, Благовещенск, Россия

¹pus14@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4021-5474

²pus13@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4021-5474

³ilyhina71@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2113-7220

Реферат. Приводится обзор влияния качества электрической энергии и несимметричных режимов работы на системы автоматического управления технологическими линиями в сельском хозяйстве, с учётом приоритетных направлений развития российской промышленности и сельского хозяйства, а также с учётом перспективы цифровизации экономики страны. Рассмотрен вопрос влияния качества электроэнергии на термическое состояние электронных компонентов, работу асинхронных двигателей и другого оборудования. Показана возможность проведения диагностики электрического оборудования при помощи преобразования Парка. За время исследования среднее значение перекаса фаз по напряжению составило 3%, по току – 26,7%, для осветительного оборудования по напряжению – до 14%. Рассмотрено влияние перекаса фаз на работу цифровых систем управления высокого и низкого уровня автоматики и на компоненты электронных схем. Показано влияние перекаса токов и напряжений на деградацию электронных компонентов, в том числе SMD компонентов и микроконтроллеров. Показана возможность термического пробоя на примере твердотельного реле управления, которое было использовано совместно с асинхронным двигателем. Предложены методы устранения негативного влияния низкого качества электрической энергии и несимметрии токов и напряжений. Для устранения перекаса фаз высокотехнологичное оборудование рекомендуется подключать с использованием промышленных стабилизаторов напряжения, а также вести работу по модернизации электрических сетей 0,4 кВ.

Ключевые слова: несимметрия, качество электроэнергии, фликер, автоматизированные системы управления, доильное оборудование, вентиляция, векторная диаграмма

INFLUENCE ON THE PERFORMANCE OF AUTOMATED SYSTEMS OF PHYSICAL PHENOMENA OCCURRING IN SINUSOIDAL CURRENT CIRCUITS

Olesya A. Pustovaya¹, Evgeniy A. Pustovoy², Tatyana A. Ilyukhina³

^{1, 2, 3}Far Eastern State Agrarian University, Blagoveshchensk, Russia

¹pus14@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4021-5474

²pus13@yandex.ru, ORCID 0000-0002-4021-5474

³ilyhina71@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2113-7220

Abstract. An overview of the influence of the quality of electric energy and asymmetric operating modes on automatic control systems of technological lines in agriculture is given, taking into account the priority areas of the development of Russian industry and agriculture, as well as taking into account the prospect of digitalization of the country's economy. The issue of influence of electric power quality on thermal state of electronic components, operation of asynchronous motors and other equipment is considered. The possibility of electrical equipment diagnostics by means of Park's transformation is shown. During the research the average value of phase imbalance in voltage was 3%, in current – 26.7%, for lighting equipment in voltage – up to 14%. Influence of phase imbalance on operation of digital control systems of high and low level of automation and on components of electronic circuits is considered. The influence of current and voltage distortion on the degradation of electronic components, including SMD components and microcontrollers, is shown. The possibility of thermal breakdown is shown on the example of a solid-state control relay, which

was used together with an asynchronous motor. Methods of elimination of negative influence of low quality of electric energy and asymmetry of currents and voltages are proposed. To eliminate phase imbalance high-tech equipment is recommended to be connected using industrial voltage stabilizers, as well as to modernize 0.4 kV electrical networks.

Keywords: *unsymmetry, power quality, flicker, automated control systems, milking equipment, ventilation, vector diagram*

Введение. Вектор развития электроэнергетической отрасли направлен на повышение эффективности использования электроэнергии. Одним из приоритетных направлений в этом отношении является повышение уровня автоматизации производственных систем с использованием автоматизированного управления на принципах нечёткой логики и приоритетных технологий (машинное зрение, искусственный интеллект и пр.) [1; 2].

Однако существенную роль при внедрении таких технологий оказывает ряд сопутствующих факторов, и прежде всего – это обеспеченность высокоскоростным интернетом, повышение качества электроэнергии. Оба представленных направления являются высокотехнологичными и требуют больших инвестиций для внедрения нового оборудования и технологий.

В настоящее время проводится большая работа по модернизации сетей сотовой связи для обеспечения высокоскоростным интернетом, однако в направлении повышения качества электроэнергии прогресс минимален, что обусловлено рядом причин. Прежде всего – это большая протяжённость электрических сетей, высокий процент морально и материально устаревшего оборудования.

Наибольший интерес для потребителя из перечисленных факторов, в связи с общим направлением на использование цифровых технологий, представляет качество электроэнергии, так как его показатели непосредственно влияют на работу электрооборудования, установленного на предприятиях и в частности на работу автоматизированных систем управления и цифровых систем контроля. К основным показателям качества электроэнергии согласно ГОСТ 32144-2013 относятся такие показатели, как несинусоидальность, колебания, фликер и пр. Так, для сетей 0,4 кВ нормируются гармонические составляющие напряжения и тока: вторая гармоника не более 2% от значения напряжения, третья – 5% и т.д. Коэффициент несимметрии напряжений – не более 2%, падение напряжения в сети – 5–10%. Наиболее проблемными в этом плане являются сельские сети, имеющие большую протяжённость и жёсткие условия эксплуатации [3; 4; 2; 5].

Производство сельскохозяйственной продукции – одно из самых востребованных направлений, при низкой доле автоматизированных процессов. Использование современного высокотехнологич-

ного оборудования в сельском хозяйстве позволит существенно снизить затраты на получение продукции и повысить её качество, однако работа автоматизированных систем тесно связана с качеством электроэнергии, низкие показатели которого приводят оборудование к выходу из строя.

Формирование режима работы сельскохозяйственных потребителей происходит под воздействием таких факторов, как состояние линий электропередач, состояние электрооборудования, находящегося в эксплуатации, правильность его подключения и т.д. Отклонение этих характеристик от номинальных приводит к появлению гармонических составляющих напряжения и тока, и как следствие, токов нулевой последовательности.

Материалы и методы исследования. Обследование электрической сети проводилось в ООО «Пограничное», Амурская область, село Нижняя Полтавка. Рассматривался режим работы оборудования, установленного на скотном дворе. На территории размещается два коровника на 400 голов, в которых установлено следующее оборудование: доильные установки с молокопроводом, скреперный транспортёр, система гидросмыва навоза, вентиляционное оборудование с установленной системой автоматического управления на ПО, осветительное оборудование. Всё рассматриваемое оборудование подключено к трансформаторной подстанции, размещённой на территории скотного двора (рис. 1).

Исследования на территории скотного двора проводились в период с 1 сентября 2019 г. по 1 декабря 2021 г. Фиксировалось значение напряжения, тока и полной мощности при помощи мультиметров ИМС-Ф1 компании Owen, модуль электроизмерительный МЭ 110-220.3М компании Owen, предназначенный для измерения параметров электрической сети. Для стабилизации напряжения использовался автоматизированный стабилизатор напряжения компании Picanto.

В период исследований оборудование вводилось в работу согласно графику технологического процесса. Вентиляционное оборудование – перерыв с 15.00 до 17.00 часов, перемещение животных на выгул. Уборка навоза – с 9.00 до 10.00 часов, с 15.00 до 17.00 часов. Утренняя и вечерняя дойка.

Результаты исследования. Проведённые исследования показали, что в сети во время под-



Рисунок 1 – Подстанция 400 кВ

ключения силового оборудования (доильная установка, вентиляторы) наблюдался перекос фаз (рис. 2). Среднее значение перекоса по напряжению за время исследования составило 3%, по току – 26,7%, по полной мощности – 32%. Работа систем автоматического управления в таких условиях становится неустойчивой, что приводит к немотивированным отключениям и аварийным ситуациям с выходом оборудования из строя. По результатам проведённых измерений для осветительного оборудования перекос по напряжению составил до 14%. Это негативно влияет на работу установлен-

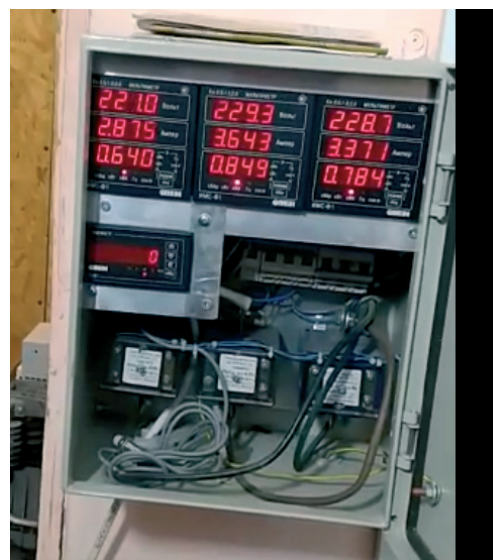
ных светодиодных светильников и сокращает их срок службы.

В идеальном состоянии на векторной диаграмме токов сумма векторов фазных напряжений и токов должна составлять ноль (рис. 3а), осциллограмма представляет собой идеальную окружность при использовании преобразования Парка.

При появлении несимметрии изображения меняются (рис. 3б), в векторной диаграмме появляется ток нулевой последовательности, осциллограмма искажается (меняется форма и чёткость



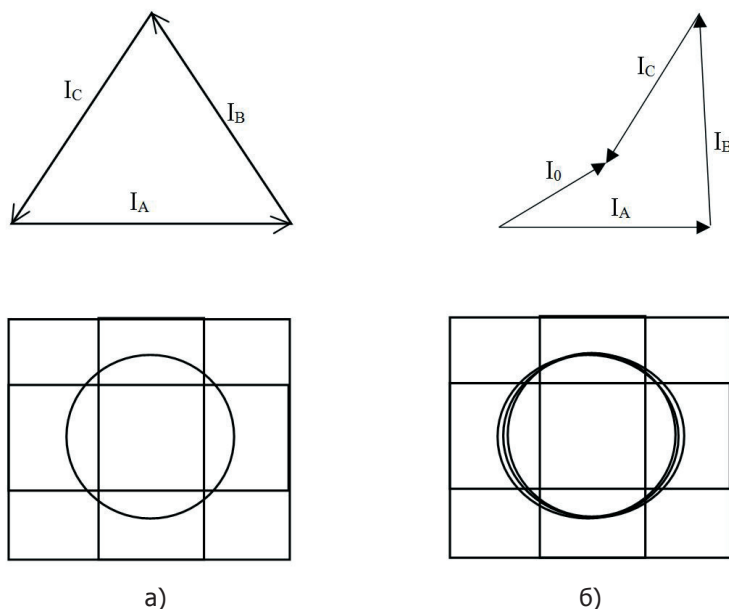
а)



б)

- а) показатель напряжения на фазе А, нагрузка – осветительное оборудование;
б) фазы А, В, С, нагрузка – доильная установка и вентиляция.

Рисунок 2 – Показатели напряжения, тока и полной мощности по фазам (коровник на 400 голов ООО «Пограничное», Константиновский район, с. Нижняя Полтавка)



а) симметричный режим; б) несимметричный режим работы трёхфазной сети.

Рисунок 3 – Векторная диаграмма и осциллограмма

изображения) [4; 5; 6; 7]. Аналогичная ситуация наблюдается с несимметрией напряжения.

Появление токов или напряжений нулевой последовательности – достаточно информативный параметр, а в совокупности с преобразованием Парка показывает характер возникшей проблемы (наличие токов утечки, повреждение изоляции и пр.). Это при использовании методов обработки с помощью искусственного интеллекта позволяет оценить состояние электрооборудования. Для силового оборудования (асинхронные двигатели) появление несимметрии влечёт отключение оборудования, так как в настоящее время реле токов нулевой последовательности является обязательным элементом схемы управления. Для схем автоматики, при помощи которых происходит управление двигателями, постоянное срабатывание реле негативно сказывается на характеристиках и с течением времени приводит к выходу из строя.

Зафиксированный факт появления токов нулевой последовательности должен стать руководством к действию при использовании высокотехнологичных автоматизированных систем управления, так как это приводит к сбоям в работе технологических линий и отказам аппаратуры управления на микроконтроллерах.

Использование автоматизированных систем получило широкое распространение в следующих отраслях:

- животноводство – это, прежде всего, микроклимат, доение и кормление животных;
- растениеводство – послеуборочная обработка зерна;

– переработка сельскохозяйственной продукции.

В этих отраслях в настоящее время автоматизированное управление строится на основе исключения присутствия оператора, как фактора, повышающего вероятность отказа системы.

Однако непредсказуемость параметров питающей электросети вносит дополнительные ограничения на установку цифровых систем.

Если рассматривать автоматизированные системы управления, то низкое качество электроэнергии, прежде всего, приводит к неправильной работе блоков питания установленного оборудования. Как правило, для цепей автоматического управления устанавливают специализированные импульсные блоки, они могут выполняться как отдельно, так и встроенными в микроконтроллер.

На территории Амурской области широкое распространение получило оборудование компании Owen с рабочим напряжением в пределах от 85 до 264 В. Снижение напряжения ниже указанных параметров для таких устройств приводит к прекращению питания цепей автоматики. При превышении верхней границы импульсный блок питания выходит из строя. На рассматриваемом предприятии такое оборудование установлено для системы разгонной вентиляции.

Следует понимать, что это крайние значения, которые появляются в сети достаточно редко. Чаще всего напряжение находится в обозначенных границах, и блоки питания работают в штатном режиме. Однако продолжительная работа в режимах, близких к крайним, приводит к необра-

тимым изменениям в структуре электронных компонентов, в частности это обусловлено перегревом микросхем, SMD-элементов и пр. Дegradaция этих компонентов происходит быстрее, что снижает срок службы [8].

При наличии встроенного блока питания, его постоянный перегрев приводит к отслоению дорожек платы, перегреву конденсаторов, выходу из строя микроконтроллера и др. (рис. 4). В этом случае замене подлежит полностью микро-

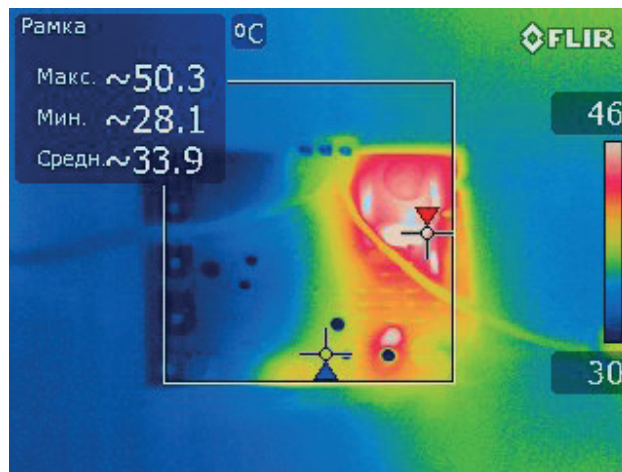


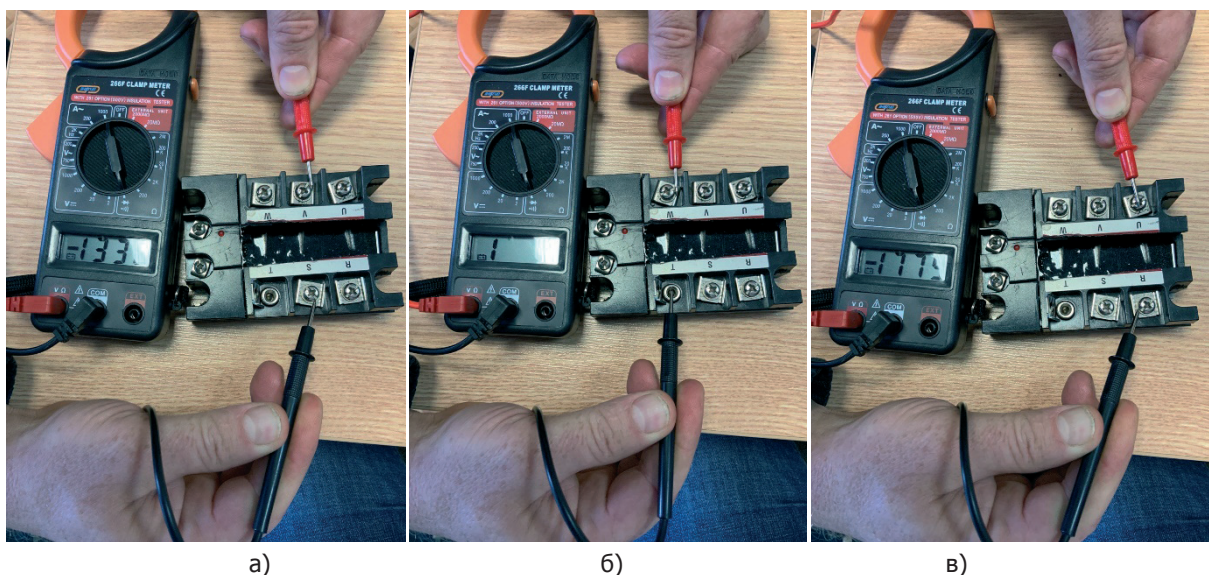
Рисунок 4 – Инфракрасный снимок платы управления

контроллер, что достаточно дорого. То же самое относится и к элементам автоматики, имеющим встроенный блок питания, – программируемым логическим контроллерам (ПЛК), устройствам плавного пуска, программируемым реле, регуляторам, измерителям.

Более чувствительными к качеству электроэнергии являются элементы автоматики верхнего уровня: персональные компьютеры, маршрутизаторы, серверы. Для них диапазон напряжений лежит в пределе 200–230 В. Даже кратковременные

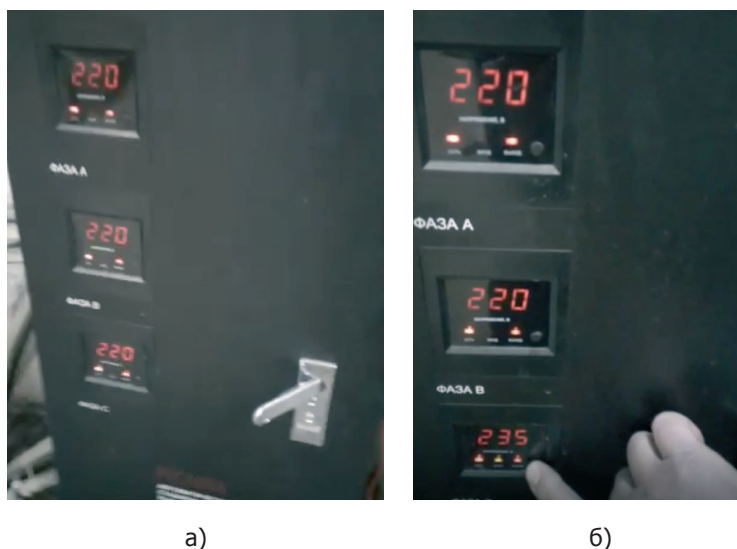
перебои с питанием и снижением качества электроэнергии приводят к нештатным отключениям и перезагрузкам всей системы. На практике можно наблюдать отказ работы ПК в связи с появлением смещения нейтрали относительно потенциала земли при условии допустимого значения напряжения фаза-ноль.

При нештатном отключении автоматики следует длительный период запуска системы, обычно от нескольких секунд до нескольких минут. В этот период объект управления находится в неуправ-



а) фаза А исправна; б) и в) фазы В и С пробиты.

Рисунок 5 – Пробой в твердотельном реле



а) значение напряжения после стабилизации; б) значение напряжения перед стабилизацией.

Рисунок 6 – Промышленный стабилизатор напряжения

ляемом режиме и работает инерционно, также возможна произвольная подача неуправляемого сигнала от системы управления, связанная, прежде всего, с переходными режимами, что повышает риск возникновения аварии.

Кроме несимметрии напряжений, также опасность представляет несимметрия токов, приводящая к выходу из строя элементов схем из-за термического пробоя. Так, большой риск пробоя возникает для твердотельных реле (рис. 5), так как для них, как и для многих устройств, в которых плата залита компаундом, теплопередача затруднена вследствие особенностей конструкции.

Выход из строя твердотельного реле из-за неполнофазного режима приводит к выходу из строя асинхронного двигателя или другого исполнительного механизма.

Таким образом, результаты исследования показывают необходимость контролировать качество электрической энергии как физического

фактора, имеющего основное влияние на работоспособность систем управления.

Одним из таких способов контроля и устранения негативного влияния является использование промышленных стабилизаторов напряжения (рис. 6). Использование их существенно снижает вероятность аварии на значимом оборудовании, к которому для ферм КРС можно отнести доильную установку, для свиноводческих хозяйств и птичников – это вентиляция и другое важное оборудование.

Выводы. Проведённые исследования показали, что к выходу из строя дорогостоящего оборудования, обеспечивающего функционирование сельскохозяйственных объектов, может приводить появление гармонических составляющих напряжения и тока и, как следствие, – токов нулевой последовательности.

Качество электроэнергии можно обеспечить только путём контроля работы подающих подстанций и модернизации электрических сетей 0,4 кВ.

Список источников

1. Концепция развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 августа 2020 № 2129-р. – Текст : электронный. – URL: <http://government.ru/docs/all/129505/> (дата обращения: 19.11.2021).
2. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : утверждены Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года № 899 (с изменениями на 16 декабря 2015 года). – Текст : электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902287707> (дата обращения: 19.11.2021).
3. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : межгосударственный стандарт : издание официальное : дата введения 2014-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом

по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Текст : электронный. – Москва : Стандартинформ, 2014. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 19.11.2021).

4. Мазуха, Н. А. Поддержание работы двигателя при обрыве фазы питающей сети / Н. А. Мазуха, А. П. Мазуха. – Текст : непосредственный // Сельский механизатор. – 2017. – № 8. – С. 32–33. – ISSN 0131-7393.

5. Рахимов, О. С. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях / О. С. Рахимов, Д. Н. Мирзоев, Е. И. Грачева. – Текст : электронный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 209–222. – DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-pokazateley-kachestva-i-poter-elektroenergii-v-nizkovoltnyh-selskih-elektricheskikh-setyah/viewer> (дата обращения: 20.11.2021).

6. Саликова, Н. С. Статистика аварий и отказов в электрических сетях Егиндыкольской районной электросети / Н. С. Саликова, О. В. Савин. – Текст : электронный // Science & Reality. – 2020. – № 3. – С. 48–51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/statistika-avariy-i-otkazov-v-elektricheskikh-setyah-egindykolskoy-rayonnoy-elektroseti> (дата обращения: 20.11.2021).

7. Черкасова, Н. И. Анализ состояния сельских электрических сетей 10 кВ в свете мониторинга отказов / Н. И. Черкасова. – Текст : электронный // Ползуновский вестник. – 2012. – № 4. – С. 49–54. – URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2012_04/pdf/049cherkasov.pdf (дата обращения: 20.11.2021).

8. Popa, G. N. On currents asymmetry protection for three-phase low voltage induction motors / G. N. Popa, C. M. Dinis, S. I. Deaconu. – Text : electronic // International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 4-6 Oct. 2018. – URL: https://www.researchgate.net/publication/329291865_On_Currents_Asymmetry_Protection_For_Three_Phase_Low_Voltage_Induction_Motors (дата обращения: 22.12.2021).

References

1. Konceptija razvitija regulirovanija otnoshenij v sfere tehnologij iskusstvennogo intellekta i robototekhniki do 2024 goda : utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19 avgusta 2020 № 2129-r. – Текст : jelektronnyj. – URL: <http://government.ru/docs/all/129505/> (data obrashhenija: 19.11.2021).

2. Ob utverzhdenii prioritetnyh napravlenij razvitija nauki, tehnologij i tehniki v Rossijskoj Federacii i perechnja kriticheskikh tehnologij Rossijskoj Federacii : utverzhdeny Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 7 ijulja 2011 goda № 899 (s izmenenijami na 16 dekabrya 2015 goda. – Текст : jelektronnyj. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902287707> (data obrashhenija: 19.11.2021).

3. GOST 32144-2013. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : mezhgosudarstvennyj standart : izdanie oficial'noe : data vvedenija 2014-07-01 / razrabotan Obshhestvom s ogranichennoj otvetstvennost'ju «LINVIT» i Tehnicheskim komitetom po standartizacii TK 30 «Jelektromagnitnaja sovmestimost' tehničeskikh sredstv». – Текст : jelektronnyj. – Moskva : Standartinform, 2014. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (data obrashhenija: 19.11.2021).

4. Mazukha, N. A. Podderzhanie raboty dvigatelja pri obryve fazy pitajushhej seti / N. A. Mazukha, A. P. Mazukha. – Текст : neposredstvennyj // Sel'skij mehanizator. – 2017. – № 8. – С. 32–33. – ISSN 0131-7393.

5. Rakhimov, O. S. Jeksperimental'noe issledovanie pokazatelej kachestva i poter' jelektrojenerгии v nizkovoľtnyh sel'skikh jelektricheskikh setjah / O. S. Rakhimov, D. N. Mirzoev, E. I. Gracheva. – Текст : jelektronnyj // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 209–222. – DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-pokazateley-kachestva-i-poter-elektroenergii-v-nizkovoltnyh-selskih-elektricheskikh-setyah/viewer> (data obrashhenija: 20.11.2021).

6. Salikova, N. S. Statistika avarij i otkazov v jelektricheskikh setjah Egindykol'skoj rajonnoj jelektroseti / N. S. Salikova, O. V. Savin. – Текст : jelektronnyj // Science & Reality. – 2020. – № 3. – С. 48–51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/statistika-avariy-i-otkazov-v-elektricheskikh-setyah-egindykolskoy-rayonnoy-elektroseti> (data obrashhenija: 20.11.2021).

7. Cherkasova, N. I. Analiz sostojanija sel'skikh jelektricheskikh setej 10 kV v svete monitoringa otkazov / N. I. Cherkasova. – Текст : jelektronnyj // Polzunovskij vestnik. – 2012. – № 4. – С. 49–54. – URL: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pv2012_04/pdf/049cherkasov.pdf (data obrashhenija: 20.11.2021).

8. Popa, G. N. On currents asymmetry protection for three-phase low voltage induction motors / G. N. Popa, C. M. Dinis, S. I. Deaconu. – Text : electronic // International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 4-6 Oct. 2018. – URL: https://www.researchgate.net/publication/329291865_On_Currents_Asymmetry_Protection_For_Three_Phase_Low_Voltage_Induction_Motors (data obrashhenija: 22.12.2021).

Сведения об авторах

Олеся Александровна Пустовая – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации технологических процессов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет», spin-код: 2905-8994.

Евгений Анатольевич Пустовой – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации технологических процессов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет», spin-код: 2071-6363.

Татьяна Алексеевна Илюхина – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики и информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет», spin-код: 5703-5729.

Information about the authors

Olesya A. Pustovaya – Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Technological Processes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State Agrarian University", spin-code: 2905-8994.

Evgeniy A. Pustovoy – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Technological Processes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State Agrarian University", spin-code: 2071-6363.

Tatyana A. Ilyukhina – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Physics and Computer Science, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State Agrarian University", spin-code: 5703-5729.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

